

# Correlación de specklegrams en fibras ópticas y sus aplicaciones a los sensores

## Specklegrams correlation in optical fibers and their applications to sensors

Mauro Lomer, Luis Rodriguez-Cobo, Ruben Ruiz- Lombera, J.M. Lopez-Higuera

Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, Avda. Los Castros s.n., 39005 Santander  
Persona de contacto: Optoel ([lomerm@unican.es](mailto:lomerm@unican.es)).

### RESUMEN:

Un patrón de speckle es observado cuando un haz de luz coherente se propaga por una fibra óptica multimodo. Este patrón es generado por interferencia aleatoria entre los modos propagados y es extremadamente sensible al medio ambiente y a las perturbaciones que se ejercen sobre la fibra. Los cambios espaciales del speckle pueden ser registrados por una simple cámara CCD obteniéndose los specklegrams, que procesados adecuadamente, permiten construir una señal representativa de correlación que permiten determinar el origen de la perturbación. La extensión de este concepto a sensores permiten la medida de parámetros físicos, químicos o biológicos. Se describen el principio de generación de specklegrams en fibras y ejemplos de aplicación en sensores.

**Palabras clave:** patrón de speckle, specklegrams, sensores de fibras, fibras ópticas multimodo.

### ABSTRACT:

A speckle pattern is observed when a beam of coherent light propagates through a multi-mode optical fiber. This pattern is generated by random interference between modes propagated and is extremely sensitive to the environment and the perturbation exerted on the fiber. Speckle spatial changes can be recorded by a simple CCD camera obtaining the specklegrams, which processed properly, allow building a cross correlation signal for determining the source of the disturbance. Extending this concept to allow measurement sensors of physical, chemical or biological parameters. The principle of fiber specklegrams generation and application examples of sensors are described.

**Key words:** speckle pattern, specklegrams, fiber sensor, multimode optical fiber.

## 1.- Introducción

El patrón de speckle generado en fibras ópticas multimodo es extremadamente sensible a las variaciones ambientales que rodean a la fibra, así como a las perturbaciones que afectan a cualquier parte su estructura geométrica a lo largo de la propagación de la luz en el núcleo [1]. El fenómeno de speckle, en comunicaciones ópticas se denomina ruido modal y limitan el ancho de banda de trans-

misión, pero en metrología puede ser beneficioso debido a que existe correlación entre los cambios espaciales del speckle con el origen de las perturbaciones. Basado en este fenómeno se han propuesto varios tipos de sensores, tales como vibración [2], desplazamiento o distancia [3]. En la actualidad los componentes opto-electrónicos han aumentado su prestaciones y se han reducidos sus costes, los programas de cálculo y procesado son más rápidos y accesibles, por lo que se

pueden diseñar sensores altamente eficientes y de bajo costo utilizando el fenómeno de speckle en fibra óptica con fuentes diodos láseres y cámaras CCD de tipo webcam de muy bajo coste.

En el presente documento se describe el principio de generación de speckle en fibra óptica multimodo para diferentes tipos de diámetro de núcleo y sus aplicaciones a sensores. Se presentan los resultados de aplicaciones realizados por los autores en los últimos años.

## 2.- Speckle en fibra óptica

El fenómeno speckle en fibra óptica se genera por interferencia entre los modos propagados, donde los modos tienen velocidades de fase diferentes. Así, dos modos cualesquiera, se pueden interferir generando su propio patrón de interferencia. Consideremos dos modos diferentes, donde las expresiones de sus campos eléctricos son descritos por:

$$\vec{E}_1(r, z) = \vec{E}_{01} \cdot \exp[j(\omega t - \beta_1 z + \phi_1)] \quad (1)$$

$$\vec{E}_2(r, z) = \vec{E}_{02} \cdot \exp[j(\omega t - \beta_2 z + \phi_2)] \quad (2)$$

donde  $\vec{E}_{0i}$  es la amplitud de la onda,  $r$  y  $\varphi$  denotan la dirección radial y azimutal, respectivamente.  $\beta$  es la constante de propagación,  $z$  la dirección de propagación,  $\omega$  la frecuencia angular,  $t$  el tiempo y  $\phi_i$  la fase del modo.  $\beta_i$  asocia a cada modo propagado con una fase aleatoria  $\phi_i$ . El índice  $i = 1$  ó  $2$ . La intensidad especial de la luz es dada por las componentes  $z$  del vector de Poynting,  $I = (1/2)\Re[E_x H_y^* - E_y H_x^*]$ ,  $H_x$  y  $H_y$  son componentes del vector de campo magnético. Para cualquier combinación, los modos se interfieren entre ellos y crean un patrón de intensidad específica diferentes de cualquiera de estos. Además, como la fase es un factor significativo de cada modo, se puede entender que cualquier perturbación en la fase se reflejara en una modulación de intensidad. Si cada speckle individual tiene una intensidad dada por  $I_i$ , la intensidad total es aproximadamente constante, es decir,

$$I_t = \sum_{i=1}^N I_i = \text{cte}$$

donde  $N$  es la cantidad total de speckle.

Aquí, asumimos el mismo cálculo desarrollado en la referencia [2], donde el resultado simplificado por integración sobre un speckle es dado por la sumatoria de los campos,

$$I_i = A_i \{1 + B_i [\cos \delta_i - F(t) \phi_i \sin \delta_i]\} \quad (3)$$

donde  $A_i$  representa el término representativo de la auto-interacción de cada modo.  $F(t)$ ,  $B_i$  y  $\phi_i$  son términos de la interferencia de modo-modo.  $F(t)$  el término de perturbación realizada sobre la fibra en función del tiempo,  $B_i$  tiene en cuenta el estado estable de la interacción modo-modo. El argumento de las funciones  $\delta_i$ , contiene:  $\delta_i = \Delta\beta_{ml} - \Delta\phi_{ml}$ ,

donde  $\Delta\beta_{ml}$  y  $\Delta\phi_{ml}$  representan la diferencia entre la constante de propagación y la fase aleatoria de los modos de  $m$  y  $l$ . por lo que son términos fuera de fase. Cuando la fibra es perturbada, el término de interacción modo-modo es afectado por  $\phi_i$ . Los términos,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $\phi_i$  y  $\delta_i$  son valores constantes para cualquier valor de  $i$ .

La cantidad de speckle formados por interferencia entre los modos propagados por la fibra es aproximadamente proporcional a la cantidad de modos soportados por la fibra. Así, a mayor diámetro de núcleo, mayor es la cantidad de speckle para una misma longitud de onda. Por tanto, la intensidad del patrón de speckle es más sensible a las perturbaciones externas en la fibra cuando más grande es la cantidad de speckle presentes en la cara de salida de la fibra. Así, el número entero de speckle ( $N_s$ ) es calculado por [1]  $N_s \approx (2a)^2 (NA)^2 / \lambda^2$ , donde  $2a$  es el diámetro del núcleo,  $NA$  la apertura numérica y  $\lambda$  la longitud de onda de la fuente láser. De otro lado, el tamaño medio del speckle ( $S$ ) proyectado sobre una pantalla es dado por [4]:  $S = 2d(\lambda/2a)$ , donde  $d$  es la distancia perpendicular de la fibra a la pantalla. El diámetro de distribución del campo speckle es:  $D \approx 2d(NA)$ . Si todos los modos son excitados en una fibra de salto de índice de 1mm de diámetro de núcleo y  $NA=0.5$ , y utilizando un láser HeNe ( $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ ) se tendría alrede-

dor de seis millones de speckle's y de tamaño medio  $12\text{ }\mu\text{m}$  a una distancia  $d = 1\text{cm}$  de la fibra.

### 3.- Caracterización

Los patrones de speckle han sido obtenidos experimentalmente con diferentes diámetros de núcleo de fibra multimodo. En la fig. 1 se ilustra las fotos de 3 patrones de speckle correspondientes a diámetros de núcleos de 50, 240 y  $980\text{ }\mu\text{m}$  de fibras ópticas plásticas. Dependiendo de las aplicaciones, la talla de los speckle se puede elegir según la cantidad de modos propagados. El patrón de speckle es más sensible cuando la cantidad de modos aumenta, tal como se muestra en la Fig. 2, donde las fibras sometidas a una vibración de 25 Hz, los patrones de las fibras de 240 y  $980\text{ }\mu\text{m}$  son más sensibles que la de  $50\text{ }\mu\text{m}$ , donde pone en evidencia la influencia de la talla del speckle [5]. En este caso, se han capturado las imágenes con una cámara CCD de alta velocidad y se han realizado una simple diferencia entre imágenes para extraer la señal de correlación.

Debido a los débiles diámetros de las fibras utilizadas, y teniendo una superficie del CCD de algunos  $\text{mm}^2$ , se exploró la posibilidad de realizar medidas simultáneas, que en el futuro se puedan medir varios parámetros diferentes [6]. En la Fig. 3 se muestra una foto con dos patrones de speckle. Los círculos marcados por A, B y C representan las regiones donde se han realizado el procesado por simple diferencia.

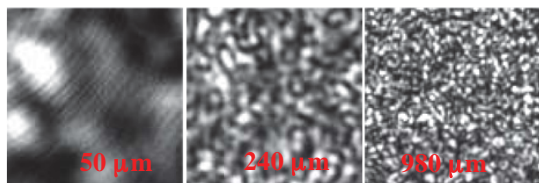


Fig. 1: Talla de speckle en obtenidos con diferentes diámetros de núcleo de fibra multimodo de plástico.

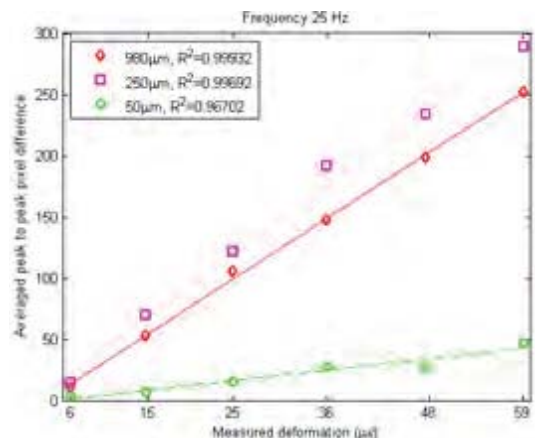


Fig. 2: Sensibilidad del patrón de speckle a la vibración de frecuencia de 25 Hz para diferentes diámetros de núcleo de fibra.

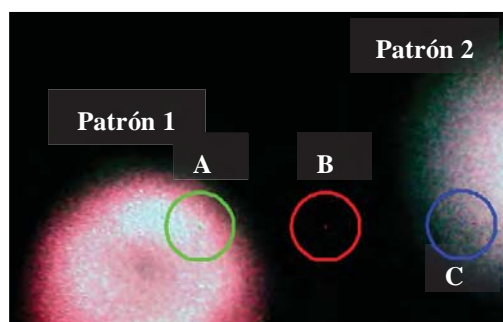


Fig. 3: imagen de dos patrones de speckle utilizando la superficie del CCD.

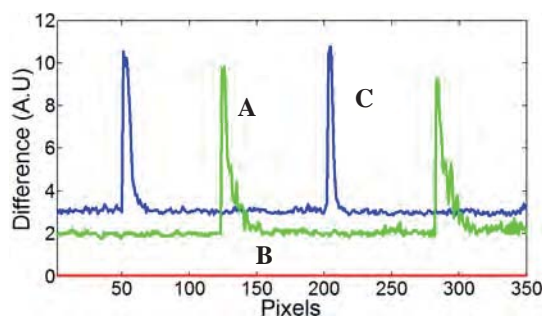


Fig. 4: La figura va con estilo "Fig", mientras que su pie va

Los resultados son mostrados en la Fig. 4, se puede observar que las señales A y C son independientes, y la señal B que es una región no iluminada su nivel de intensidad relativa es nulo.

#### 4.- Aplicaciones a sensores

Se ha demostrado que el patrón de speckle es muy sensible al medio ambiente y que sin ejercer ninguna perturbación, los gránulos de luz varían lentamente en el tiempo. Pero, cuando se ejercen cambios abruptos sobre la fibra, como por ejemplo vibraciones, presión, torsión, tensión, etc., el patrón cambia a gran velocidad. Estas variaciones de patrón de speckle pueden ser capturadas mediante imágenes de vídeo, a través de una cámara CCD. Así, un análisis y tratamiento adecuado de los cambios en las imágenes puede ser utilizado para extraer la información de la causa de la perturbación, esto es una correlación entre causa y efecto. A continuación, presentamos algunos ejemplos de aplicación utilizando los specklegrams en fibra óptica.

En la Fig. 5, se muestra la medida del pulso arterial ubicando un tramo de la fibra óptica en la muñeca de la mano [7]. Los resultados obtenidos fueron coincidentes bastante bien con las medidas utilizando técnicas convencionales. En la Fig. 6, se muestra la medida de respiración, un lazo de fibra fue adherido a una cinta elástica y ubicada alrededor del tórax [8]. El perfil del ritmo respiratorio muestra bien las etapas de aspiración y expiración con un tramo de descanso. En ambos casos las medidas se realizaron con una población de 20 personas de ambos sexos y en reposo.

En la Fig. 7 se muestra el resultado experimental de 14 etapas de variación de la velocidad del motor por control de voltaje, mantenidas durante 10 segundos. Las medidas de vibración mediante specklegrams (en círculos azules) son comparados con la medida pico a pico de la aceleración (en picos verdes). El primer y el último círculo son medidos en condiciones de no vibración inducida, por lo que es menos sensible en las condiciones de ensayo. Las dos medidas tienen la misma tendencia, lo que permite validar el método de medida. En la curva se observa una variación abrupta en la tendencia lineal descendente ( $t=70$  segundos), esto es debido a la frecuencia de resonancia del motor, medido también con el acelerómetro.

Otras aplicaciones de los specklegrams realizadas por los autores se pueden encontrar en las referencias [10-11].

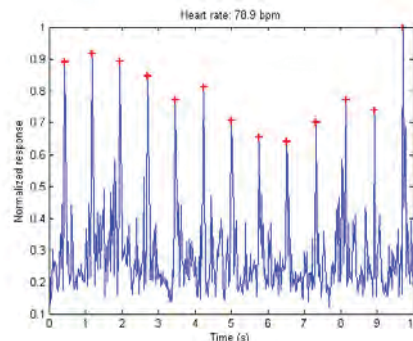


Fig. 5: Medida del pulso arterial.

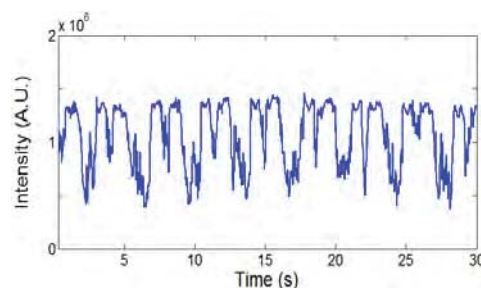


Fig. 6: Medida del ritmo respiratorio.

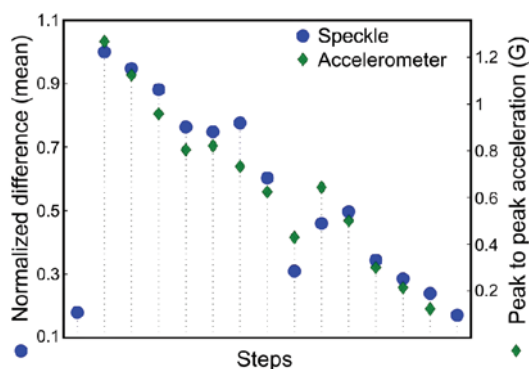


Fig. 7: Medida de vibración.

#### 4.- Conclusión

Se ha demostrado que el patrón de speckle generado en fibras ópticas es sensible a los parámetros medio-ambientales, capaz de detectar pequeñas gradientes de temperatura en ambientes aislados o vibraciones estructu-



rales de edificios. A pesar que en telecomunicaciones ópticas el patrón de speckle representa una fuente de ruido, sus características y propiedades espaciales pueden ser explotadas como técnicas de medidas de parámetros físicos, químicos o biológicos.

Los avances tecnológicos permiten disponer diodos láseres muy versátiles, cámaras CCD de alta velocidad, ambos de muy bajo coste que pueden ser utilizados en los sensores basados en el uso de los specklegrams. Adicionalmente, los programas de cálculos son cada vez más rápidos por lo que las medidas puede ser realizado en tiempo real.

*Agradecimientos:* Este trabajo ha sido soportado por el proyecto TEC2010-20224-C02-02

## Referencias

- [1] J.W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics*, Roberts and Company, Chapter 7, Englewood, Colorado, (2007).
- [2] W.B. Spillman, B.R. Kline, Statistical-mode sensor for fiber optic vibration sensing uses, *Appl. Opt.* **28**, 3166–3176 (1989).
- [3] F.T.S. Yu, M. Wen, S. Jing, and C.M. Uang, “Submicrometer displacement sensing using inner-product multimode fiber speckle fields”, *Applied Optics*, **32**, 4685-4689, (1993).
- [4] L.G. Shirley, E. D. Ariel, G. R. Hallerman, H. C. Payson, and J. R. Vivilecchia, “Advanced techniques for target discrimination using laser speckle,” *Linc. Lab. J.* **5**(3), 367–440 (1992).
- [5] L. Rodríguez-Cobo, M. Lomer, “Speckle characterization in multimode fiber for sensing applications”, *V International Conference on Speckle Metrology, Proceedings of SPIE* Vol. 8413, paper 40, Vigo, Spain, September 2012.
- [6] M. Lomer, L. Rodríguez-Cobo, P. Revilla, G. Herrero, F. Madruga, and J. Lopez-Higuera, “Speckle pof sensor for detecting vital signs of patients,” in *OFS2014 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors, Santander, Spain (2014)*.
- [7] M. Lomer, L. Rodríguez-Cobo, J.M. Lopez-Higuera, “Plastic optical fiber sensor for measuring arterial pulse”, *Proceeding, The 21th Int. Conference on Plastic Optical Fibers*, September 10-12, Atlanta, USA (2012).
- [8] M. Lomer, L. Rodríguez-Cobo, J.M. Lopez-Higuera, “Plastic optical fiber sensor for measuring of respiration based of changes speckle pattern”, *The 23<sup>rd</sup> International Conference on Plastic Optical Fibre*, Yokohama, Japan, October 8-10 (2014).
- [9] L. Rodríguez-Cobo, M. Lomer, “POF vibration sensor based on speckle pattern changes”, *22<sup>nd</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors OFS-22, Proceedings of SPIE* Vol. 8421, paper 2y1-4, Beijing, China 2012.
- [10] L. Rodríguez-Cobo, M. Lomer, A. Cobo, J.M. Lopez-Higuera, “Optical fiber strain sensor with extended dynamic range based on specklegrams”, *Sensor and Actuator A*, **203**, 341-345 (2013).
- [11] L. Rodríguez-Cobo, M. Lomer and J.M. Lopez-Higuera, “Fiber Specklegram Multiplexed Sensor”, *IEEE J. Lightwave Technol. IEEE*, accepted for publication DOI: 10.1109/JLT.2014.2364318 (2014).